УДК 622.831.242.4

С.Ф. ВЛАСОВ, д-р техн. наук, проф., Є.В. МОЛДАВАНОВ, асп.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ХАРАКТЕРУ РОЗПОДІЛУ КОНВЕРГЕНЦІЇ В ЛАВІ ПІД ЧАС ПОСАДКИ СЕКЦІЙ МЕХАНІЗОВАНОГО КРІПЛЕННЯ «НА ЖОРСТКУ БАЗУ» В УМОВАХ ШАХТ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ

Мета. Виконати аналіз закономірностей розподілу конвергенції в лаві під час посадки секцій механізованого кріплення «на жорстку базу», які сталися за причини наявності у покрівлях вугільних пластів потужних пісковиків, на підставі комплексу зібраних даних геологічного прогнозу шахт Західного Донбасу, а також результатів моделювання покровового переміщення очисного вибою в просторовій геомеханічній моделі виїмкової ділянки. На основі аналізу отримати та описати рівнянням характер розподілу величин зближення бічних порід.

Методи дослідження. В роботі застосовано метод комп'ютерного моделювання геомеханічних процесів навколо очисного вибою, що базується на чисельному математичному методі скінченних елементів (МСЕ) за критерієм міцності Мора-Кулона.

Наукова новизна. В результаті проведення геомеханічного моделювання руху очисного вибою вперше встановлено закономірності характеру розподілу величин конвергенції в лаві, під час посадки секцій механізованого кріплення «на жорстку базу». А саме, встановлено, що зміна величин конвергенції має характер розподілу Пуассона, а також Гаусса, або нормального розподілу. Встановлення закономірностей дозволить у подальшому обґрунтувати раціональні параметри відпрацювання вугільних пластів з метою підвищення ефективності видобутку кам'яного вугілля на шахтах Західного Донбасу.

Практичне значення. Аналіз закономірностей розподілу конвергенції уздовж лави під час посадки секцій механізованого кріплення «на жорстку базу» дозволить обґрунтувати й розробити раціональні параметри очисного виймання, з урахуванням мінливих параметрів залягання пісковиків у покрівлі, задля попередження, а також зведення до мінімуму аварійних зупинок очисних вибоїв шахт Західного Донбасу.

Результати. Виконано моделювання покровових переміщень очисних вибоїв у просторовій геомеханічній моделі, на підставі якого встановлено закономірності характеру розподілу конвергенції в лаві під час посадки секцій механізованого кріплення «на жорстку базу», які трапилися в реальних умовах шахт Західного Донбасу за останній час. Представлено порівняння результатів моделювання та фактичних даних, зібраних на підприємствах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля».

Ключові слова. Відстань міжпласта, вугільний пласт, глибина розробки, конвергенція, лава, покрівля пласта, посадка «на жорстку базу», потужність шарів.

doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-51-3-8

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. За даними звіту [1] Міністерства енергетики України, видобуток рядового вугілля за 2019 рік сягнув 31,2 млн т. Виконання планового завдання склало 94,4 %. За різних причин до завдання було недовидобуто 1,86 млн т. Що ж стосується результатів роботи вуглевидобувних підприємств Західного Донбасу, можна сказати, що за цей же період було видобуто 18,2 млн т. Виконання планового завдання склало 92,2 %. Втрати видобутку вугілля склали 1,54 млн т, або 82,7 % від загальноукраїнських.

Аналізуючи причини зниження вуглевидобутку, можна сказати, що одним з багатьох факторів мають місце бути аварійні зупинки очисних вибоїв, які пов'язані з втратою секцій механізованого кріплення робочої висоти та посадкою їх «на жорстку базу». Для більшого розуміння проблеми, до аналізу було включено звіт по аваріях за календарний період – січень 2018 р. – липень 2020 р.

Характеризуючи зібраний матеріал на шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» по даному питанню, можна стверджувати, що в усіх випадках вирішальну роль відігравала наявність у покрівлі вугільних пластів потужних пісковиків (3,4 – 21,0 м). Вони вчасно не відсікалися й утворювали так званий «породний міст», який до моменту переходу у позамежний стан утримував верхні шари гірських порід. Після чого пісковики раптово втрачали свою міцність та руйнувалися, тим самим провокуючи втрату робочого опору секцій механізованого кріплення та посадку їх «на жорстку базу».

Звіт по аваріях, пов'язаних з посадкою секцій механізованого кріплення «на жорстку базу» наведено в табл. 1.

Звіт по аваріях, пов'язаних з посадкою секцій механізованого кріплення «на жорстку базу»
за січень 2018 - липень 2020 років по ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»

Час простою днів/год.	Шахта	Лава, №	Втрата видобутку під час простою, т	Тип простою	Кількість секцій кріплення, які зазнали посадки, од.
05 – 09.08.2018	Західно-Донбаська	863	3080	Зняття секцій кріплення з жорсткої бази	36
08 – 23.11.2018	ім. Сташкова	636-північна	32107		32
20 – 25.09.2019	ім. Героїв Космосу	1174	12120		73
15 – 20.04.2020	Дніпровська	1099	10980		47
28.05 – 03.06.2020	Степова	151	10007		60
40/960			68294		256

Аналіз результатів попередніх досліджень показує, що вплив пісковиків на величину конвергенції в лаві, як окремої літологічної підсистеми, вивчений не досить повно саме в комп'ютерному моделюванні посування очисного вибою вздовж виїмкового стовпа. Зокрема, відсутні закономірності характеру розподілу величин зближення бічних порід. Відсутність цих закономірностей повною мірою ускладнює обґрунтування раціональних параметрів відробки вугільних пластів у даному регіоні.

Аналіз досліджень та публікацій. Що ж стосується аналізу досліджень та публікацій стосовно прогностного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) шаруватого породного масиву, слід відмітити Калініченко О.В., який на підставі виконаних досліджень та встановлених залежностей визначив зміну НДС масиву в умовах шахтного поля шахти «Гігант-Глибока» [2]. Науковцями з НТУ «Дніпровська політехніка» [3] було виконано чисельне моделювання впливу поверхонь тріщин при оцінці міцності породного масиву. Мануйленко Р.І. [4] виконав дослідження НДС вуглепородного масиву під час відпрацювання вугільного пласта. Групою дослідників УкрНДМІ НАН України було досліджено розподіл НДС масиву гірських порід навколо очисного вибою за допомогою комп'ютерного моделювання [5]. Гірничим інженером-науковцем Мартовицьким А.В. було виконано чисельний аналіз змін НДС гірського масиву при послідовному посуванні очисного вибою від монтажно-ї камери [6]. Ним визначено критичний розмір виробленого простору, при якому відбувається посадка основної покрівлі, а також представлено дані візуальних та інструментальних спостережень за станом порід при відході лави від монтажно-ї камери. Вченими УкрНДМІ НАН України було проведено дослідження механізму зсуву породних шарів над виробленим простором в зоні впливу очисних робіт, а також руйнування шару внаслідок вигину [7]. Дослідниками з Китаю He M., Zhu G., а також Guo Z. було сформульовано новий метод видобутку вугілля, шляхом компонування «теорії розрізання консольної балки» та методу № 110, який може забезпечити теоретичну та технічну базу для розвитку гірничодобувної промисловості [8]. Науковцями з НТУ «Дніпровська політехніка» було розкрито механізм формування позамежних навантажень на механізоване кріплення очисних комплексів у процесі посадки основної покрівлі при відпрацюванні пологих вугільних пластів в умовах обводненого вуглевмісного масиву слабких порід [9]. Групою вчених з Китайського університету гірництва та технологій створено просторову геомеханічну комп'ютерну модель ділянки виїмкового стовпа, яка містила в собі чотири зони: перша – руйнувань гірського масиву, друга – пластичних напружень, третя – підвищених пластичних напружень, четверта – напружень у глибині гірського масиву [10]. На основі розрахованих результатів були запропоновані методи підвищення стійкості привибійного простору задля уникнення високих напружень у покрівлі на секції механізованого кріплення. Австралійські науковці з університету Ньюкастл виконали та порівняли чисельне моделювання прогнозу руйнування покрівлі гірських порід після проходження лави за допомогою трьох критеріїв: звичайного Мора-Кулона, Мора-Кулона з виключенням напружень, а також Хоека-Брауна [11]. Дослідники з НТУ «Дніпровська політехніка» провели аналіз шахтних спостережень і вимірів процесу формування навантаження на механізоване кріплення очисного комплексу 1МКД-80 в умовах відпрацювання пологого вугільного пласта в тонкошаруватому обводненому масиві слабких гірських порід [12]. У роботі Власова С.Ф. та Сидельникова О.А. [13] було обґрунтовано технологічні параметри відпрацювання виїмкових ділянок на основі результатів моделювання покрокового переміщення очисного вибою у

просторовій геомеханічній моделі виїмкового стовпа, який розташовано в шаруватому трансверсально-ізотропному масиві гірських порід. Вчені з Індійського інституту технологій запропонували підхід чисельного моделювання прогнозу руйнування порід покрівлі, яке призводить до динамічного перенавантаження та посадки секцій механізованого кріплення «на жорстку базу» [14]. Також було виконано розрахунок 324 геомеханічних моделей взаємодії бічних порід з секціями механізованого кріплення [15].

На основі отриманих результатів було розроблено моделі статистичної регресії для встановлення взаємозв'язку між вхідними та вихідними параметрами. У зазначених вище дослідженнях автори не приділили уваги до впливу пісковиків, як окремої літологічної підсистеми, на формування характеру розподілу величини конвергенції в очисному вибої. Тому вирішення цього питання є дуже важливим і актуальним для підвищення ефективності видобутку вугілля на шахтах Західного Донбасу.

Постановка завдання. В роботі досліджуються закономірності розподілу конвергенції в лаві під час посадки секцій механізованого кріплення «на жорстку базу» за причини наявності у покрівлі вугільних пластів потужних пісковиків. Завданням дослідження було виконати моделювання покрокового переміщення очисних вибоїв у просторовій геомеханічній моделі, на підставі якого необхідно отримати графіки розподілу зближення бічних порід під час аварій.

Для виконання дослідження було застосовано методику Власова С.Ф. і Сидельникова О.А., в якій було додатково враховано параметри залягання пісковиків [13]. За допомогою програмного пакета SolidWorks 2019 було побудовано п'ять імітаційних моделей випадків посадки секцій механізованого кріплення «на жорстку базу» в умовах шахт ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». Вихідні технологічні та гірничо-геологічні дані з урахуванням параметрів залягання пісковиків, а також засобів механізації наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Вихідні дані для побудови моделі

Лава, №	863	636-північна	1174	1099	151
Найменування пласта	C_8^H	C_6	C_{11}	C_{10}^B	C_6
Система розробки	стовпова	стовпова	стовпова	стовпова	стовпова
Відстань аварії від монтажною камери, м	590,0	160,0	915,0	310,0	180,0
Довжина лави, м	280,0	210,0	270,0	280,0	230,0
Глибина розробки, м	489,0	341,0	280,0	364,0	503,0
Відстань пісковика вище покрівлі пласта, м	14,6	19,9	26,0	0,7	13,2
Потужність пісковика, м	6,0	21,0	3,4	16,0	11,0
Виймана потужність пласта, м	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Розмір моделі у напрямку руху очисного вибою, м	870,0	501,0	592,0	674,0	689,0
Розмір моделі в поперек руху очисного вибою, м	629,0	446,0	415,0	504,0	618,0
Розмір моделі по вертикалі, м	540,0	392,0	331,0	415,0	554,0
Тип механізованого кріплення	КД-90	КД-90	КД-90	КД-90	OSTROJ 70/125 T
Тип кріплення підготовчих виробок	КШПУ-14,4	КШПУ-14,4	КШПУ-14,4	КШПУ-14,4	КШПУ-14,4

Порівняння результатів експерименту з фактичними даними відбувалось у співставленні довжини зони конвергенції з величиною понад 400 мм, отриманої в результаті розрахунку, з шахтними даними по кількості секцій, які зазнали посадки «на жорстку базу» за їх загальною довжиною. Величина різниці цих показників становила величину похибки.

Викладення матеріалу та результати. Актуальною задачею відтворення реальних умов, шляхом побудови просторових геомеханічних комп'ютерних моделей покрокового переміщення очисного вибою уздовж виїмкових ділянок, є виявлення характеру розподілу конвергенції бічних порід під час аварійних посадок секцій механізованого кріплення «на жорстку базу», з урахуванням пісковиків як основного фактора.

Спираючись на вищевикладене, з метою обґрунтування, у подальшому раціональних параметрів відробки вугільних пластів, а також перевірки ступеня похибки між результатами моделювання та фактичними даними, розглянуто аналіз характеру розподілу конвергенції у 863 лаві шахти «Західно-Донбаська»: величина потужності пісковика становила 6,0 м, відстань заля-

гання пісковику вище покрівлі пласта – 14,6 м. Результати характеру розподілу конвергенції наведено на рис. 1.

Рис. 1. Характер розподілу конвергенції уздовж 863 лави ПК 207 під час посадки секцій механізованого кріплення «на жорстку базу»

На рис. 1 показано, що зміна величин конвергенції уздовж 863 лави, має характер розподілу Пуассона з $\lambda = 440$ мм. Характер розподілу Пуассона можна описати наступним рівнянням

$$Pr = (X = k) \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, k \in N_0, \quad (1)$$

де λ – математичне очікування випадкової величини (середня кількість подій за фіксований проміжок); $k!$ – факторіал числа k ; e – основа натурального логарифму ($e = 2,71$).

Також з рис. 1 можна стверджувати, що зміна величин конвергенції уздовж 863 лави, також має характер розподілу Гаусса, тобто нормального розподілу.

Нормальний розподіл виникає тоді, коли випадкова величина, в даному випадку конвергенція бічних порід, являє собою суму великої кількості незалежних величин, кожна з яких відіграє незначну роль в утворенні всієї суми.

Характер розподілу Гаусса, можна описати рівнянням

$$f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

де μ – математичне очікування; σ^2 – дисперсія випадкової величини; σ – стандартне відхилення.

З метою перевірки методу моделювання на точність, а також обґрунтування у подальшому раціональних параметрів відробки вугільних пластів розглянуто аналіз характеру розподілу конвергенції у 636 - північній лаві шахти «ім. Сташкова»: величина потужності пісковику становила 21,0 м, відстань залягання пісковику вище покрівлі пласта – 19,9 м.

Результати характеру розподілу конвергенції наведено на рис. 2.

Рис. 2. Характер розподілу конвергенції уздовж 636 - північної лави ПК 85 під час посадки секцій механізованого кріплення «на жорстку базу»

З рис. 2 можна зробити висновок, що зміна величин конвергенції уздовж 636-північної лави має характер розподілу Пуассона з $\lambda = 430$ мм. Цей розподіл величин можна описати рівнянням (1).

Також з рис. 2 можна стверджувати, що зміна величин конвергенції уздовж 636-північної лави також має характер розподілу Гаусса, тобто нормального розподілу.

Розподіл величин зближення бічних порід описано рівнянням (2).

Також було виконано чисельне моделювання характеру розподілу конвергенції у 1174 лаві шахти «ім. Героїв Космосу»: величина потужності пісковика становила 3,4 м, відстань залягання пісковика вище покрівлі пласта – 26,0 м. Результати характеру розподілу конвергенції наведено на рис. 3.

Рис. 3. Характер розподілу конвергенції уздовж 1174 лави ПК 47+5 м під час посадки секцій механізованого кріплення «на жорстку базу»

Дивлячись на рис. 3, можна констатувати, що зміна величин конвергенції уздовж 1174 лави має характер розподілу Пуассона з $\lambda = 487$ мм. Характер розподілу конвергенції бічних порід описано рівнянням (1).

Характеризуючи рис. 3, також можна сказати, що зміна величин конвергенції уздовж 1174 лави має характер розподілу Гаусса, тобто нормальний розподіл.

Розподіл величин зближення бічних порід описано рівнянням (2).

Аналогічним чином було отримано характер результату розподілу конвергенції по 1099 лаві шахти «Дніпровська», а також по 151 лаві шахти «Степова».

Висновки та напрями подальших досліджень. У результаті проведеного моделювання з урахуванням пісковиків можна сказати, що зміна величини зближення бічних порід в усіх п'ятих лавах має характер розподілу Пуассона: з $\lambda = 440$ мм для 863 лави шахти «Західно-Донбаська», з $\lambda = 430$ мм для 636-північної лави шахти «ім. Сташкова», з $\lambda = 487$ мм для 1174 лави шахти «ім. Героїв Космосу», з $\lambda = 450$ мм для 1099 лави шахти «Дніпровська», а також з $\lambda = 333$ мм для 151 лави шахти «Степова». Характер розподілу Пуассона описано рівнянням (1).

Також можна зробити висновок, що зміна величин конвергенції уздовж очисних вибоїв має характер розподілу Гаусса, тобто нормальний розподіл. Нормальний розподіл виникає тоді, коли величина, в даному випадку конвергенція бічних порід, являє собою суму великої кількості незалежних величин, кожна з яких відіграє незначну роль в утворенні всієї суми. Характер розподілу Гаусса, також описано рівнянням (2).

Порівнюючи результати числового моделювання з фактичними даними, можна констатувати, що похибка коливається в межах 11,1 – 18,0 %. Ще підтверджує те, що застосована методика має високу достовірність та наукову цінність.

Перевіривши ефективність методики та отримавши високу достовірність закономірностей характеру розподілу конвергенції, в подальших дослідженнях необхідно значно розширити діапазон параметрів залягання пісковиків, з урахуванням їх потужності, відстані залягання вище покрівлі пласта, глибини розробки, а також довжини відходу лави від монтажної камери для виявлення нових закономірностей їх впливу на геомеханічні процеси навколо очисного вибою та задля обґрунтування раціональних параметрів відпрацювання вугільних пластів в умовах шахт Західного Донбасу.

Список літератури

1. Звіт Міністерства енергетики України про виконання завдання з видобутку рядового вугілля за грудень 2019 р. [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245435525
2. **Калініченко О. В.** Фізичне моделювання стійкості масиву при формуванні та підтримці підземних гірничих виробок / **О. В. Калініченко** // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2018. – Вип. 47. – С. 97 – 102.
3. **Бабец Д. В.** Численное моделирование влияния поверхности трещин при оценке прочности породного массива / **Д. В. Бабец, Е. А. Сдвижкова, Д. О. Сосна** // Вісник Криворізького національного університету. – 2018. – Вип. 47. – С. 169 – 175.
4. **Мануйленко Р. И.** Расчет напряженно-деформированного состояния и газонасыщенности массива при выемке угольного пласта / **Р. И. Мануйленко, И. А. Турбор** // Гірничий вісник. – 2014. – Вип. 97. – С. 301 – 305.
5. **Бугаева Н. А.** Исследование напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг длинного очистного забоя. Настройка модели / **Н. А. Бугаева, Ю. М. Селезнева, И. В. Назимко** // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – Вип. 32. – С. 114 – 118.
6. **Мартовичий А. В.** Исследование параметров обрушения сложноструктурного породного массива при движении лавы от монтажной камеры на ПСП «шахта Степная» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» / **А. В. Мартовичий** // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – №31. – С. 54 – 59.
7. Механизм сдвижения породных слоев над выработанным пространством / **Н. И. Лобков, С. В. Козырь, Л. Н. Крижановская, Р. М. Арутюнян** // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – 2015. – №15. – С. 21 – 30.
8. **Manchao H.** Longwall mining «cutting cantilever beam theory» and 110 mining method in China – The third mining science innovation / **H. Manchao, Z. Guolong, G. Zhibiao** // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2015. – №24. – С. 31 – 41.
9. Исследование нагружения крепи очистного комплекса в сложных горно-геологических условиях / **В. И. Бондаренко, И. А. Ковалевская, М. В. Барабаш, В. Г. Черватюк**. // Уголь Украины. – 2015. – №6. – С. 31 – 35.
10. Stress changes around collapse column and the control technology by directly passing operation in longwall working face / [**C. Zhang, S. Tu, Q. Bai** та ін.]. // Journal of China University of Mining and Technology. – 2014. – №43. – С. 974 – 980.
11. **Suchowerska A.** Prediction of roof collapse of rectangular underground openings using two forms of the Mohr-Coulomb failure criterion / **A. Suchowerska, J. Hambleton, J. Carter** // AusRock 2014: Third Australasian Ground Control in Mining Conference. – 2014. – С. 11 – 31.
12. **Симанович Г. А.** К вопросу нагружения крепи очистных комплексов в сложных горно-геологических условиях / **Г. А. Симанович, Д. С. Астафьев, А. С. Гусев** // Mining of mineral deposits. – 2013. – №7. – С. 81 – 85.
13. **Власов, С.Ф.** Пространственное моделирование геомеханических процессов при подземной разработке месторождений: моногр. / **С.Ф. Власов, А.А. Сидельников**. – Д.: Национальный горный университет, 2012. – 222 с.
14. **Singh G.** A numerical modeling approach for assessment of progressive caving of strata and performance of hydraulic powered support in longwall workings / **G. Singh, U. Singh** // Computers and Geotechnics. – 2009. – №36. – С. 1142 – 1156.
15. **Verma A.** Statistical And Neural Regression Approach For Prediction of Longwall Chock-shield Support Pressure / **A. Verma, D. Deb** // 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics. – 2007. – С. 1 – 4.

Рукопис подано до редакції 01.10.2020

УДК 528.48

А.О. АННЕНКОВ, канд. техн. наук, доц.

Київський національний університет будівництва і архітектури

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРИ ГЕОДЕЗИЧНОМУ МОНІТОРИНГУ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

Мета. Метою даної роботи є аналіз використання штучних нейронних мереж при геодезичному моніторингу інженерних споруд, а також знаходження оптимальної кількості нейронів, які максимально точно та якісно характеризують деформаційний процес.

Методи. Дослідження виконувалось на комплексі промислових об'єктів ММК «Азовсталь», де була створена геодезична система моніторингу інженерних споруд комбінату. Система складається з наступних елементів: 3 опорних геодезичних пункта примусового центрування у вигляді металевих трубчастих опор; 12 осадочних реперів, які закріплені у цоколь будівлі; 25 деформаційних марок, розташованих на несучих конструкціях будівлі; нівелір; тахеометр. На протязі 2,5 років виконувалось спостереження за деформаціями будівель та споруд з виявленням вертикальних осадок та планових здвигів споруд. Результати зйомок були оброблені спочатку стандартними функціями математичної статистики, а потім за допомогою методу нейронних мереж. Для цього використовувався модуль MATLAB. Була створена ШНМ, виконано її навчання, проведено моделювання та тестування, вибрані входні, скриті